# レーダの取り扱い

v7.4 May.2015

**【目的】**

レーダシステムの構造原理を理解し、装置の取り扱い方法を取得する。

**【原理】**

レーダとは Radio Detection And Ranging（電波による探知および測距）の頭文字をとったものである。類似のソナは Sound Navigation And Ranging（音波による航行および測距）であり、電波の減衰が激しい水中などでは効率の良い手法である。

レーダは電波（主にマイクロ波）を照射してターゲットを検出し、その距離と方位の測定を行う装置である。具体的には送信した電波がターゲット表面で反射され、再びアンテナに戻ってくるまでの往復時間からターゲットまでの距離を測り、その瞬間に向いているレーダアンテナの方向からターゲットの方位を測るものである。したがって、**距離測定**と**方位測定**がレーダの基本である。

**（距離測定の原理：パルスレーダ方式）**

山に向かって大声で叫ぶとエコー（こだま、反響）が返ってくる。いま、発声からエコーを聞くまでの時間を 2 秒とすれば、声は 340×2=680 m（ただし、音速は 340 m/s とする）の距離を伝搬したことになる。したがって、発声者と対面している山との距離 R は 680 m の半分 R=340 m である。図 1 左のようにレーダは音速を光速に置き換えて考えるだけである。t=0 s で送信アンテナから電波を発射し、電波が物体で反射されて再びアンテナに戻ってくるまでの時刻を Δt[s]とするとき、物体までの距離 R[m]は光速を $c=3\times10^8$ m/s とすると次式で与えられる。

$$R=\frac{1}{2}c\Delta t$$

一般的なレーダは送信と受信を同一のアンテナで行うため、送信波と受信波が重ならないように（こちらが話しているのに相手も同時に話し出すとわけがわからなくなるのと同じ）**繰り返しパルス波**が使われている（図 1 右参照）。このパルス波の幅 τ は 0.1～1 μs 程度であり、繰り返し周期 T は 100～1000 μs 程度である。繰り返し周期は十分遠方からのエコーを聞けるようにパルス幅に比べて極めて長くなっている。このようにレーダ用の電波はマイクロ波がパルス変調されたものである。

**検討 1** **送信パルス幅を τ [μs]としたとき、電波の照射軸上に存在する隣接した 2 つのターゲットを識別できる距離 $\Delta l_{min}$[m]はどのような式で表現されるか考えよ。ヒントは図 2**

答え $\Delta l_{min}=150\,\tau$ [m]

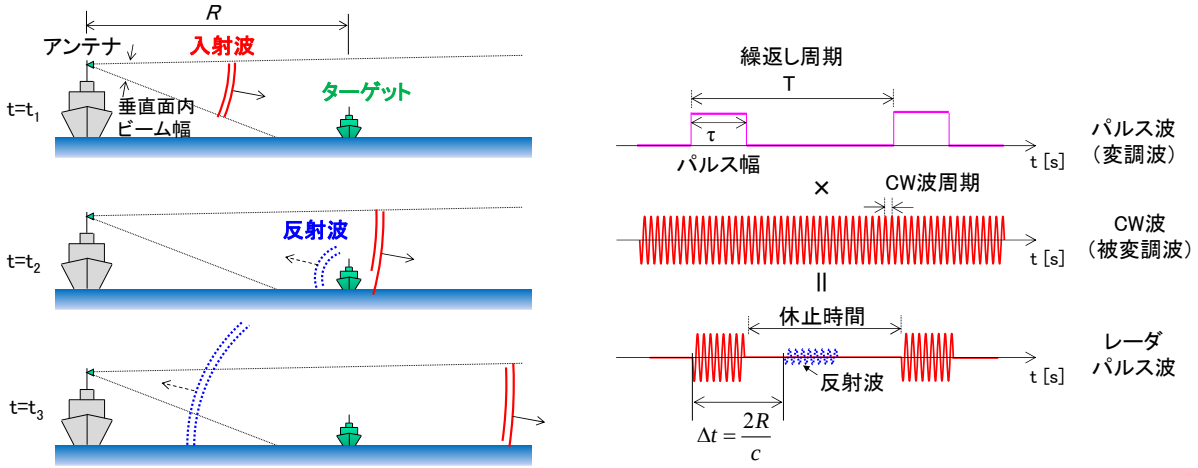
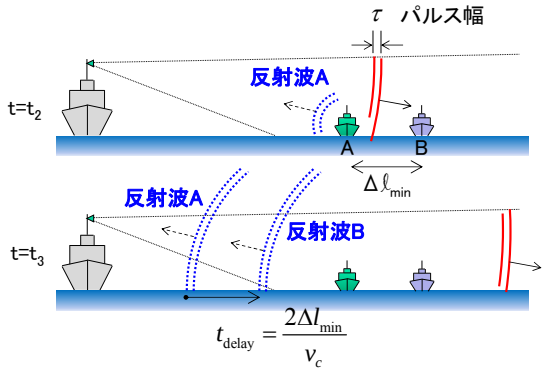



図 1. 送信アンテナから発射されたパルス波が、ターゲットで反射されて送信アンテナに戻るまでの時系列イメージ（左）。レーダで使用されるパルス波形のイメージ（右）。横軸は時間、縦軸は振幅を表す。要した時間から距離 R を求めることができる。休止時間の間に反射波を受信することができる。




$t_{delay} = \frac{2\Delta l_{min}}{v_c} = \tau$ に等しいとき、反射波Aと反射波Bは引っ付いてしまう。
（ターゲットAとターゲットBを分離できない）

$$\Rightarrow \boxed{\Delta l_{min} = \frac{\tau v_c}{2}}$$

図 2. 隣接する 2 つのターゲットを識別できる限界距離反射波 B は反射波 A に比べて $t=2\Delta l_{min}/c$ だけ遅れて伝搬する。これがパルス幅 τ に等しいと反射波 A と B はくっついて区別できなくなる。

**（距離測定の原理：FMCW 方式）**

パルスレーダ方式とともに良く使われる距離測定方法として FM-CW (Frequency Modulated - Continuous Wave)方式がある。この方式は、送信アンテナの周波数 ft[Hz]をある帯域幅 fw[Hz]で掃引し、ある時刻における送信周波数 ft[Hz]と受信周波数 fr[Hz]との周波数差 fB[Hz]を計測し、図 3 の式(3)の関係を使ってターゲットまでの距離 R[m]を求めている。パルスレーダ方式が送受パルスの時間差を測定する時間領域測定であるのに対して、FMCW 方式は送受の周波数差を測定する周波数領域測定と言うことができる。本測定器は前述のパルスレーダ方式を使用している。

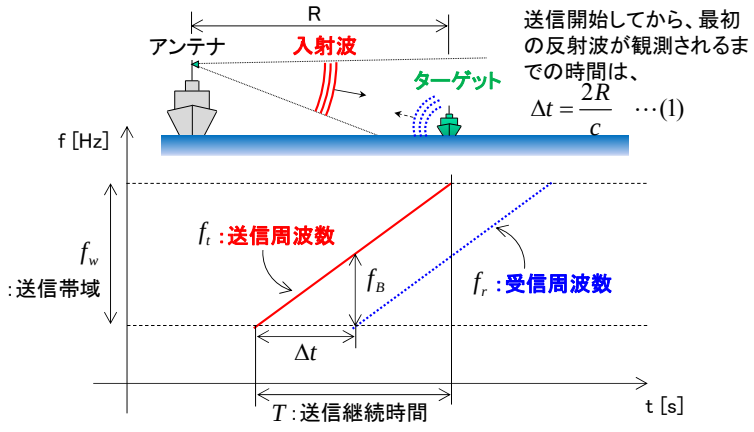



図 3. FMCW 方式による距離測定の原理

**（方位測定の原理）**

方位測定の概念を図 4 に示す。アンテナが扇形の**ビーム形状（ファンビームと呼ぶ）**を有する場合、これを方位方向に 360° 回転させて回転角度を把握しておけば、どの方位の反射波かを見分けることができる。しかし、遠方の反射波を完全に受信し終わるまでにアンテナの方位が変わってしまうと不都合が生じる。逆に考えると、最も遠方にあるターゲットまでの往復に要する時間内は、アンテナは静止している必要がある。ターゲットの最大探知距離を $R_{max}$ とすると、往復に要する時間は

$$t = \frac{2R_{max}}{c}$$

であるから、最大探知距離を考えて**アンテナの回転速度**を決める必要がある。アンテナの回転速度がこの時間に比べて十分に小さければ距離測定を行っている間アンテナは静止していると見なせる。

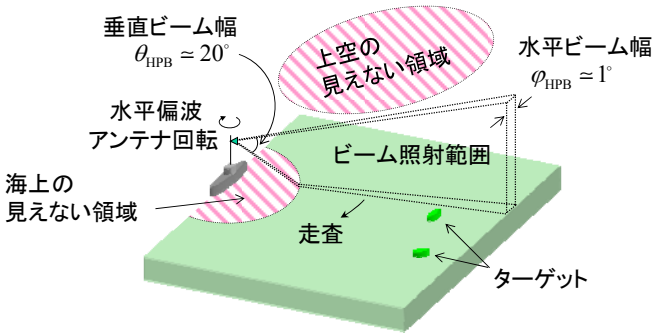



図 4. 船舶探知を目的としたレーダで使用されるアンテナビーム形状のイメージ。
アンテナを 360° 回転させることによりビーム照射範囲内の反射波を受信することができる。

**【測定系】**

パルスレーダ測定回路の一例を図 5 に示す。まず、**同期信号発生器**で発生したパルス信号は、変調器で大電流パルスに変換される。そしてパルスの継続時間だけ**マグネトロン**が発振し、必要な送信電力を確保した後、**送受切り替えスイッチ**を通して送信アンテナへ送られる。送受切り替えスイッチの役割は、非常に強い送信パルス電力が受信回路に侵入して内部回路(とくにミキサ)を損傷するのを防ぐためである。一方、パルスの休止時間にアンテナに再来した反射波は、送受切り替えスイッチを通して増幅器へ送られ、**ヘテロダイン方式**を利用して映像信号(直流電圧)に変換される。また、最初にパルスを発生した同期信号発生器は反射波の到来時間を測定するための基準となっており、ここから距離信号となる**掃引電圧**が作られる。仮に、オシロスコープの横軸に距離信号、縦軸に映像信号をプロットすると、ある方位におけるエコーを表示することができる。

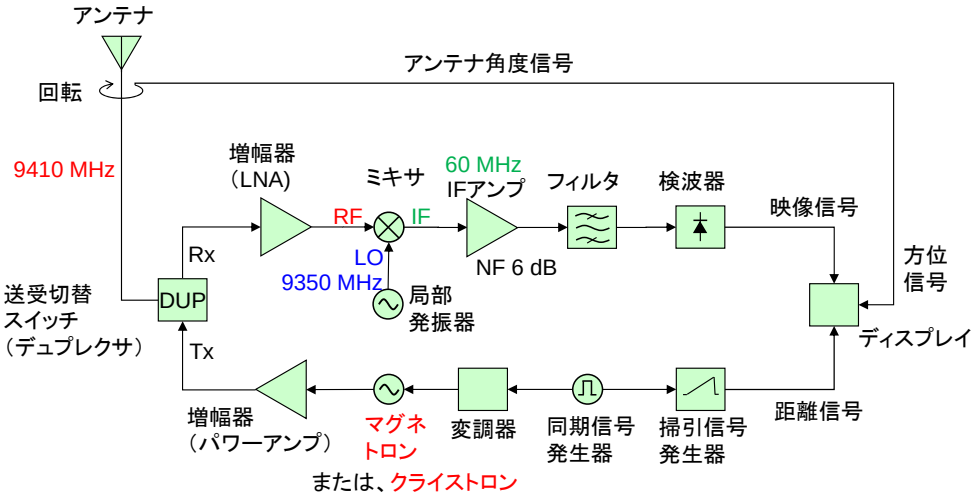



図5. 測定回路の一例。ディスプレイに向かう信号3系統のうち、上は現在のアンテナ方位を表す信号、中央は反射エコーの強さを表す信号、下は送信パルスを送る瞬間を基準とした時間信号(距離信号)を表す。

**【使用機材】**

1. レーダ映像装置, FURUNO, 70MOPON, 25 kW, 9410 MHz (取扱説明書 FAR-2107/2807 シリーズ)
2. レーダ映像装置, FURUNO, 50MOPON, 4.9 kW, 9410 MHz (取扱説明書 FR-7061)
3. 縮尺地図 2 枚(大 1/300,000 と小 1/50,000), 定規 2 本

**【測定方法】**

**1. 操作および実習**

(1) 取扱説明書の必要箇所を見ながら実習すること。とくに始動時の装置ウォームアップと終了手続きはよく読むこと。

(2) 携帯電話の GPS 地図画面を見ながら、レーダ画面上で学校から次の 3 点 ①栗島郵便局、②志々島郵便局、③高見島郵便局(郵便局がスマートフォンの GPS 地図上にない場合は港湾の人口密集地)までの距離と方位を求め、**縮**

**尺地図**から求めた理論上の距離、方位と比較して表1にまとめよ。**レーダ画面上に表示される方位角度は船首線を基準方位 0° とした角度**であることに注意すること。本実験船の**船首は真北でなく高見島を向いている**。

(3) レーダ画面上で学校から次の三点 ①粟島郵便局、②志々島郵便局、③高見島郵便局 までの距離と方位を求め、**縮尺地図**から求めた理論上の距離、方位と比較して表1にまとめよ。レーダ画面上に表示される方位角度は船首線を基準とした角度であることに注意。本実験船の船首は真北でなく高見島を向いている。

(4) 現在航行中の船を、エコートレイル機能の **15 分モード**を使用して発見し、カメラでレーダ画像を記録せよ。

(5) **縮尺地図**で丸亀市沖合の広島の位置を確認した後、定規を 2 本使用して学校から広島を挟むようにV字をつくる。このとき、左側の線は粟島の右端、右側の線は志々島の左端を通っているはずである。これと同様にして、レーダ画面上で広島を挟むように **EBL マーカ線**(取説参照)を 2 本引いてV字をつくり、広島を指示したレーダ画像を記録せよ。

(6) 机上に貼り付けてある無線局免許に記載された動作周波数と出力を記録せよ。

(7) レーダアンテナの構造(全体像およびスロット照射部の詳細)を記録せよ。アンテナの全体像は 4Fエレベータホール付近から屋上を見上げると回転しているレーダアンテナが確認できる。絶対に屋上には上がらないこと。

(8) 次の実験者のために、EBL マーカやエコートレイルなどの**追加機能を初期状態に戻して**から終了手続きをする。

(9) レポート提出時は、表 1 に加えて**(3)(4)で記録したレーダ画像**および**(6)で記録したアンテナの写真**を添付すること。

表1. 距離・方位測定結果

| | レーダ測定 | | 縮尺地図(理論) | |
|---|---|---|---|---|
| | 距離 [km] | 方位 | 距離 [km] | 方位 |
| ① | | | | |
| ② | | | | |
| ③ | | | | |

**【注意事項】**

(1) 取り扱い説明書を熟読すること。特に始動時(装置のウォームアップ)と終了時の決められた手続きは遵守すること。

**【研究事項】**

(1) 低周波の真空管がマイクロ波では利用できない理由を述べた上で、反射型クライストロンの動作原理を説明せよ。

(2) マグネトロンの発振動作原理について説明せよ。

(3) 最大探知距離、距離分解能、方位分解能、アンテナビーム形状(水平面内と垂直面内の違い)について説明せよ。

(4) 本実験のビーム走査方式はメカニカルスキャン(モータでアンテナを回転させる方式)であるが、電子スキャン(Electronically Steered Array もしくはフェーズドアレイアンテナ Phased Array Antenna)について調べよ。

**【参考文献】**


[1] 吉村, ``レーダ工学の基礎,'' 啓学出版

[2] 江村, ``基本電子計測,'' p.140, コロナ社

[3] 落合, 茂在, ``レーダの理論と実際,'' 海文堂

[4] 吉田, ``改訂 レーダ技術,'' 電子情報通信学会

[5] 堤坂, 大庭, ``テキストブック無線通信機器,'' 13 章, 日本理工出版会

[6] 飯島, 今津, ``新訂 電波航法,'' 2 章, 成山堂書店

[7] 上保, ``定在波レーダの原理とその応用,'' pp.106-107, RF ワールド No.8, CQ 出版


**【レポートについて】**

(1) 実習結果や測定結果に関する表やグラフは必ず各自で作成すること。

(2) 本実験テキストのワードファイルはウェブからダウンロードできるが、原理と測定系の単なるコピー貼り付けは不可。式の導出過程等を確認して自分のレポートを作成すること。

(3) 実験テキストの改善点提案や間違い箇所の指摘など、以降の学生実験にとって有益なアドバイスがあれば加点する。